

Expositionsanlagen für Langzeitstudien GSM 900 MHz und UMTS 2 GHz

*T. Reinhardt, A. Bitz, A. El Ouardi, J. Streckert, V. Hansen
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik
Universität Wuppertal*

*A. Lerchl
International University Bremen, Germany*



Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

Inhalt

1. Biologisches Design und technische Anforderungen
2. GSM 900: Befeldung von AKR/J - Mäusen
 - Design und Aufbau
 - Feldverteilung & Dosimetrie
3. UMTS 1: Befeldung von AKR/J - Mäusen
 - Design und Aufbau
 - Feldverteilung & Dosimetrie
4. UMTS 2: Langzeitexperiment mit Mäusen
 - Design und Aufbau
 - Feldverteilung & Dosimetrie
5. Zusammenfassung



Biologisches Design/ Technische Anforderungen

- Kooperation mit der International University Bremen
- Untersuchung biologischer Gesichtspunkte
 - u.a. Verhaltensauffälligkeiten, Vermehrungsfähigkeit und Entwicklung
- Tiere müssen sich frei in ihren Käfigen bewegen können
- Befeldung wird mit folgenden Signalen durchgeführt:
 - 1. Projekt: GSM 900
 - 2. Projekt und 3. Projekt: UMTS (generisches UMTS-Testsignal)



Anforderungen an die Exposition

- Während aller Projekte müssen die Tiere dem gleichen Feld ausgesetzt sein, unabhängig von ihrer absoluten Position im Käfig
 - Um das erreichen zu können, wird eine homogene Feldverteilung im Expositionsbereich benötigt.



Wahl der Expositionsanlage

- Anforderung:
 - Aufnahme vieler Käfige
 - möglichst homogene Feldverteilung in den Käfigen
- Benötigt: HF-Expositionskammer mit hohem Grad an Symmetrie
 - Käfige auf Zylinderfläche um eine zentrale Antenne
 - ➔ Radiale Wellenleitung

Neben hoher Symmetrie weitere Vorteile:

Elektromagnetisch abgeschirmte Expositionskammer:

- **keine weitere Abschirmung und/oder Auskleidung des Versuchsraums mit Absorbern notwendig**
- **Kammern für Expositionsgruppe und Kontrollgruppe (nicht exponiert) können direkt benachbart sein**

Grundwellentyp: TEM-Welle

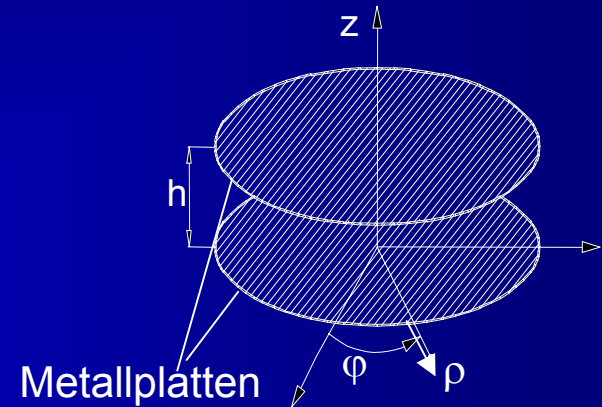


TEM - Welle

- In der leeren radialen Wellenleitung mit $h \leq \lambda/2$ und bei rotationssymmetrischer Anregung kann sich nur die TEM-Welle ausbreiten.

$$E_z(\rho, \varphi, z) = -jA \frac{k_0^2}{\omega \mu_0 \epsilon_0} H_0^{(2)}(k_0 \rho)$$

$$H_\varphi(\rho, \varphi, z) = -A \frac{k_0}{\mu_0} H_0^{(2)'}(k_0 \rho)$$



- Feldstärke ist konstant im Querschnitt der Wellenleitung
- E-Feld ist in vertikaler Richtung polarisiert
- Feldstärke klingt in Ausbreitungsrichtung näherungsweise mit $\frac{1}{\sqrt{\rho}}$ ab.
 - für große Radien keine negativen Auswirkungen auf die Feldhomogenität → vernachlässigbar

Wellentypen hoher Ordnung

$h \geq \lambda/2 \Rightarrow$ Wellentypen höherer Ordnung bzgl. der vertikalen z-Richtung sind ausbreitungsfähig, die sich der TEM-Welle in der leeren Wellenleitung überlagern

➤ TE_{0n}^z -Welle:

$$E_\varphi(\rho, \varphi, z) = A_{01} \frac{k_\rho}{\varepsilon} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \sin\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

$$H_\rho(\rho, \varphi, z) = -jA_{01} \frac{k_\rho k_z}{\omega \varepsilon \mu} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \cos\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

$$H_z(\rho, \varphi, z) = -jA_{01} \frac{k_\rho^2}{\omega \varepsilon \mu} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \sin\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

➤ TM_{0n}^z -Welle:

$$E_z(\rho, \varphi, z) = -jB_{01} \frac{k_\rho^2}{\omega \mu \varepsilon} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \cos\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

$$E_\rho(\rho, \varphi, z) = jB_{01} k_\rho \frac{k_z}{\omega \mu \varepsilon} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \sin\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

$$H_\varphi(\rho, \varphi, z) = -B_{01} \frac{k_\rho}{\mu} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \cos\left(n \frac{\pi}{h} z\right)$$

\Rightarrow inhomogene Feldverteilung im Querschnitt der radialen Wellenleitung



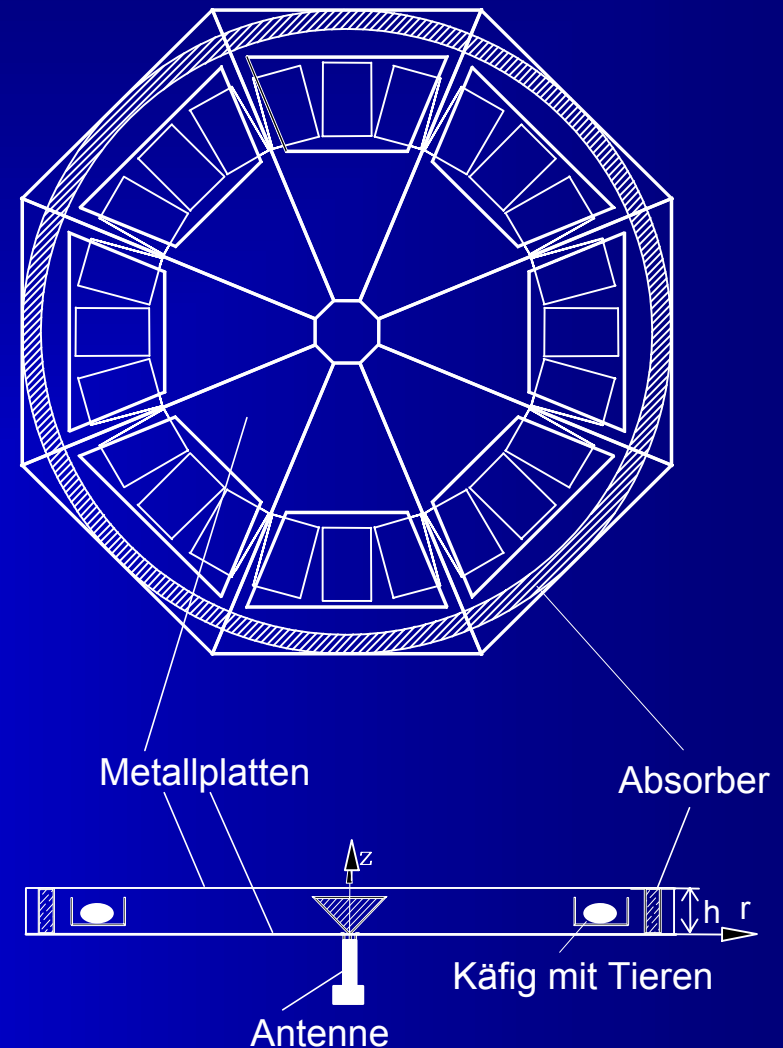
GSM 900 (abgeschlossenes Projekt)

- Exposition mit einem typischen GSM Signal 900MHz
- 2 Tiergruppen werden zeitgleich exponiert:
 - 1.Dosis: 0 (Scheinexposition)
 - 2. Dosis: 0.4 W/kg
- 320 weibliche Mäuse werden benötigt
 - 160 Mäuse werden scheinexponiert
 - 160 Mäuse werden exponiert
 - Lebenslange Exposition
 - Bis zu 7 Mäuse befinden sich in einem Käfig



Aufbau der radialen Wellenleitung für GSM 900

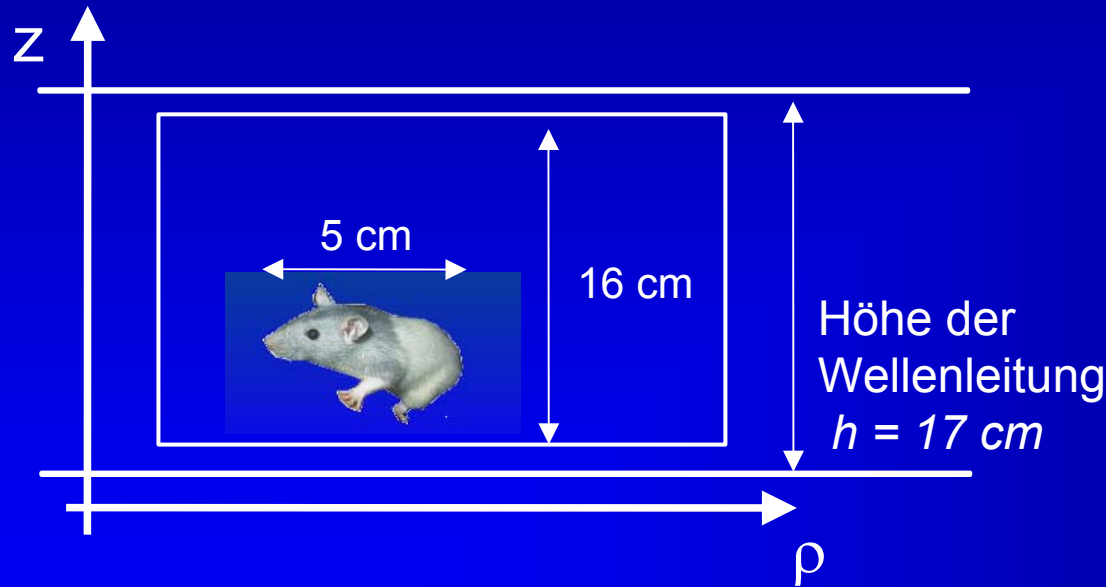
- 8-eckige Form, 4m Spannweite
- Plattenabstand 17cm
- Antenne befindet sich in der Mitte der Wellenleitung
- Käfige sind auf konstantem Radius um die Antenne angeordnet
- 24 Käfige pro Wellenleitung



GSM 900: Dimensionierung der Wellenleitung

- Durch Bestimmungen des Tierschutzes ist vorgeschriebene Höhe der Käfige:

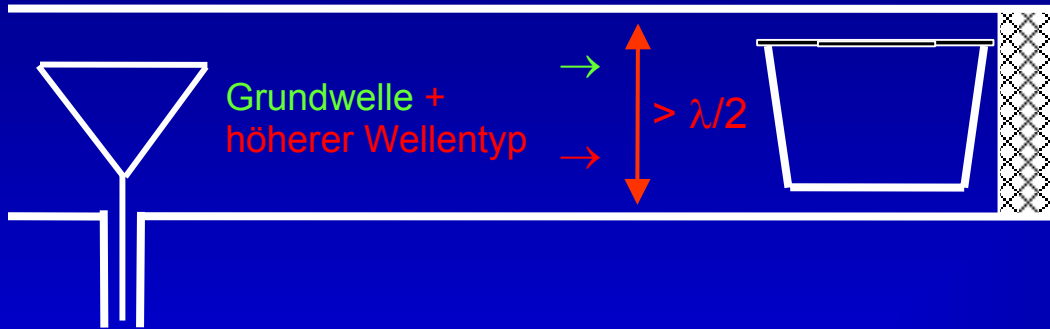
$$h_{\text{cage}} = 16 \text{ cm} > \frac{\lambda_0}{2} \approx 15 \text{ cm} \quad \text{bei } f = 900 \text{ MHz}$$



ausbreitungsfähige Wellen

Frequency	900 MHz
TEM	X
TE_{m1}	X
TM_{m1}	X

GSM 900: Dimensionierung des Wellenleiters



⇒ Feldinterferenzen

⇒ keine eindeutige Exposition

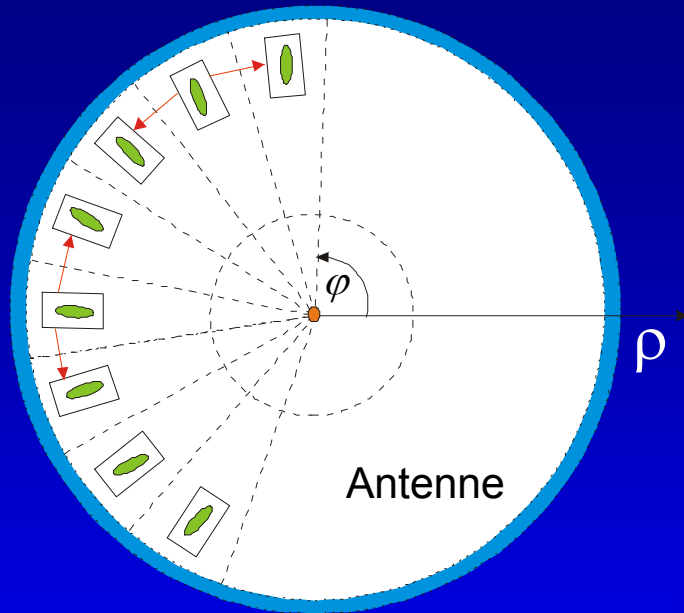


Gegenmaßnahme:
Höhenreduzierung

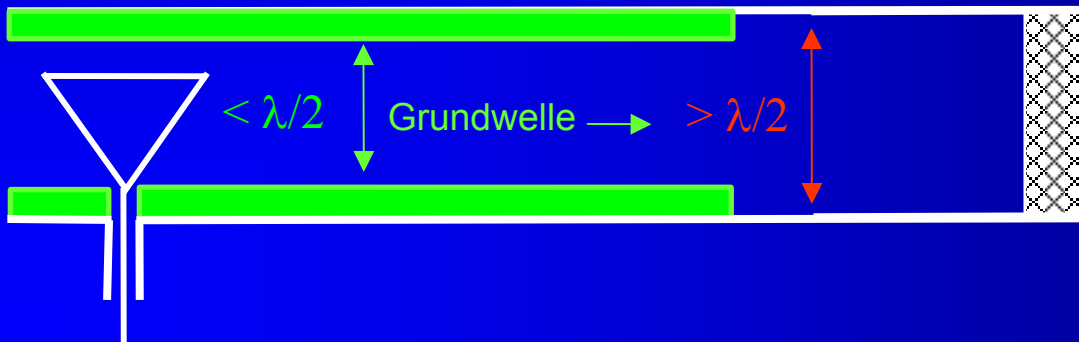
⇒ Anregung mit der
Grundwelle



GSM 900: Entkopplung der Käfigbereiche

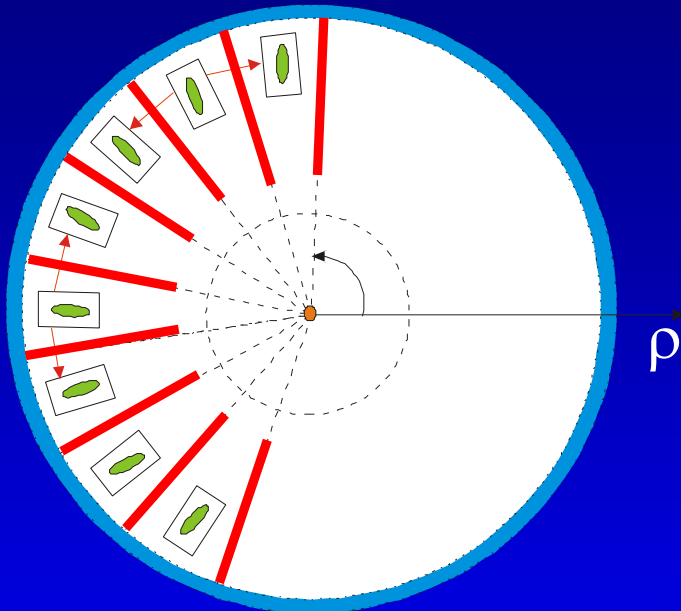


- An den Mäusen wird das Feld gestreut
- Höhere Moden, die angeregt werden, können sich ausbreiten
 - Verkopplung der Felder in den Käfigbereichen
 - Keine reproduzierbare Feldverteilung

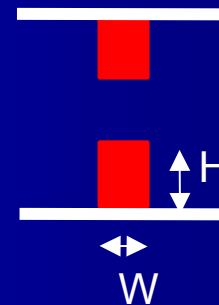
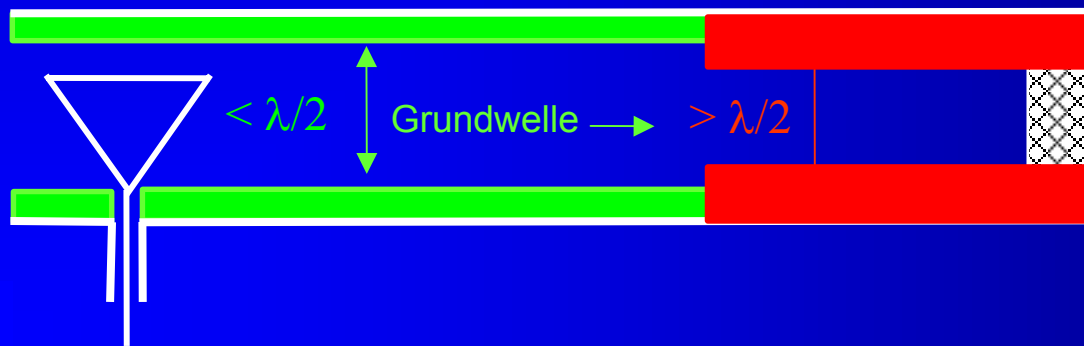


Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

GSM 900: Entkopplung der Käfigbereiche



- Gegenmaßnahme: ideal leitfähige Stege zwischen den Käfigbereichen
 - ✓ Höhere Moden können sich nicht ausbreiten
 - ✓ Entkopplung der Käfigbereiche



Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

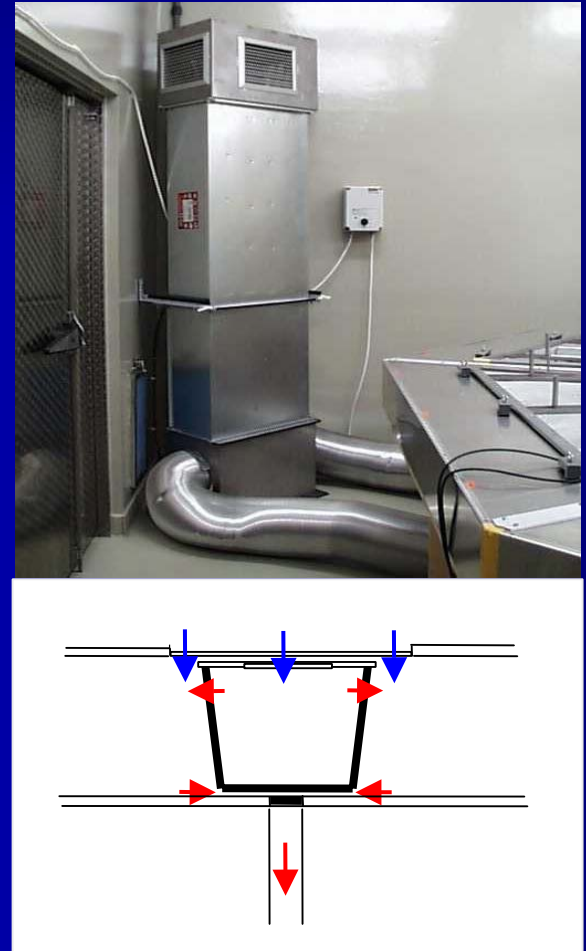
GSM 900: Expositionsanlage



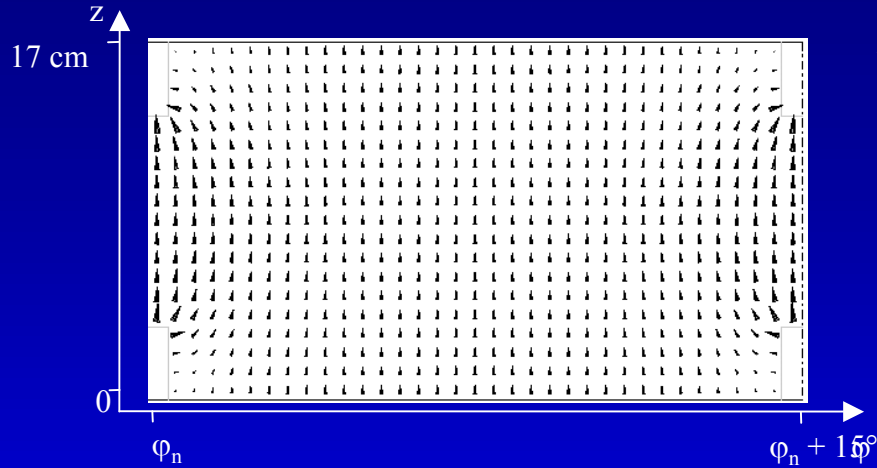
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

Reinhardt, Bitz, El Ouardi, Streckert, Hansen, Lerchl

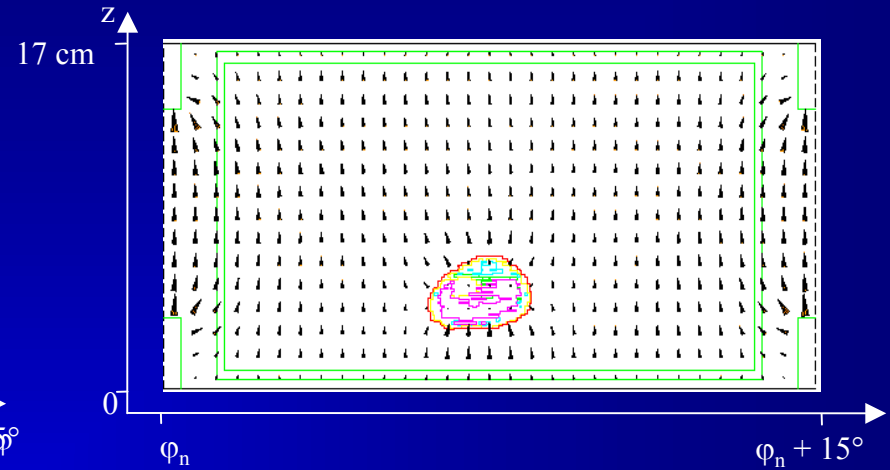
GSM 900: Expositionsanlage



GSM 900: Feldverteilung im Querschnitt eines Expositionsbereichs



Leerer Expositionsbereich



Inhomogener Streukörper befindet sich im Expositionsbereich

➤ Lokale Feldstörung

Numerische Berechnungen:

SAR: 0,4 W/kg

$P_{in} = 35 \text{ W}$

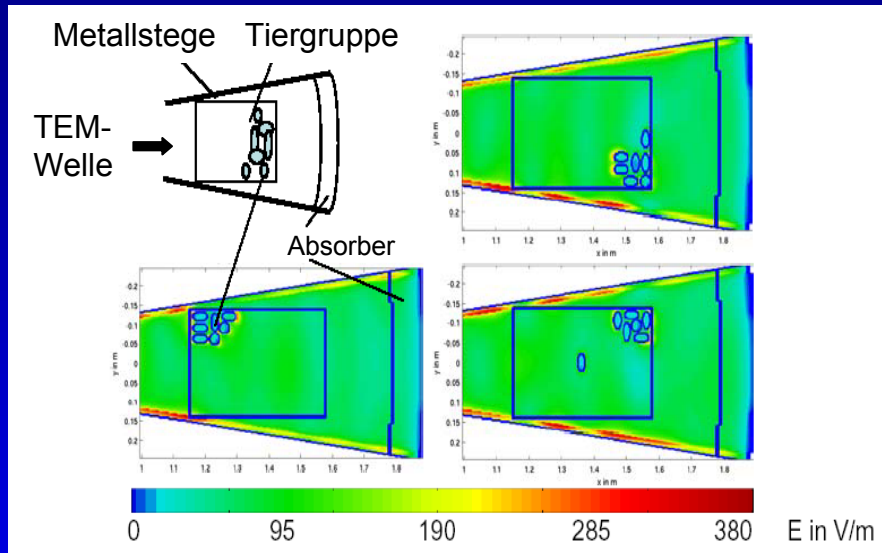
$\sigma \approx \pm 40\%$ (Ganzkörper-SAR)



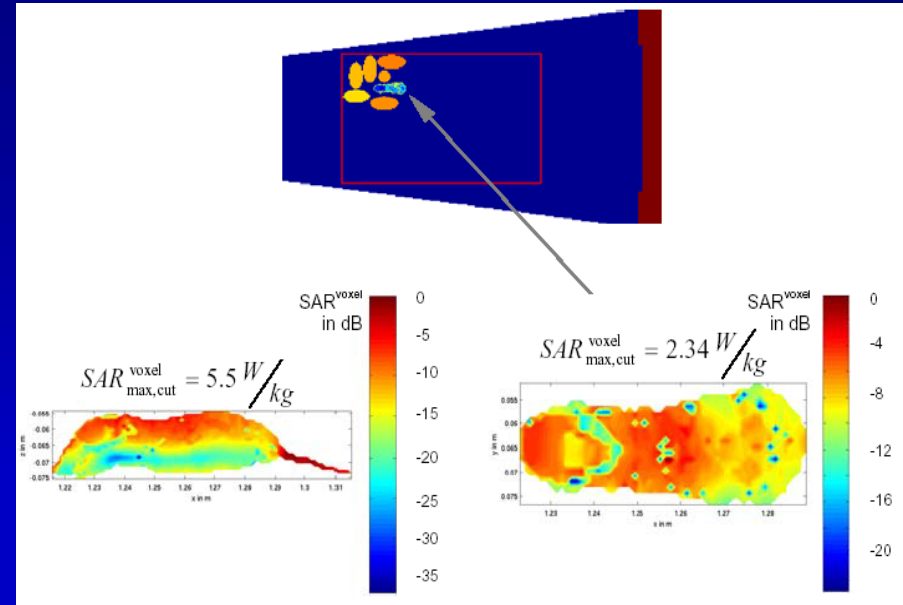
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

Reinhardt, Bitz, El Ouardi, Streckert, Hansen, Lerchl

Feldverteilung und Dosimetrie



Beispiele für die elektrische Feldverteilung bei verschiedenen Gruppierungen von 7 Mäusen im Käfig ($P_{in} = 35 \text{ W}$)



Lokale SAR Verteilung

($SAR_{wb} = 366 \text{ mW/kg}$, Auflösung 1.2mm (Voxel-Größe)).

Maximum über ein Voxel:

$SAR_{\text{voxel}} = 5.9 \text{ W/kg}$.

UMTS 1 (abgeschlossenes Projekt)

- Exposition mit einem synthetischen UMTS-Signal gemäß FDD - Standard bei 2000 MHz
- 2 Tiergruppen werden zeitgleich exponiert:
 - 1.Dosis: 0 (Scheinexposition)
 - 2. Dosis: 0.4 W/kg
- 320 Mäuse werden benötigt
 - 160 Mäuse werden scheinexponiert
 - 160 Mäuse werden exponiert
 - Lebenslange Exposition
 - Bis zu 7 Mäusen befinden sich in einem Käfig



UMTS 1: Aufbau

Die für die GSM – Frequenz 900 MHz verwendete Wellenleitung wurde im Wesentlichen übernommen

- ➔ Frequenz: 2000 MHz $\Rightarrow \lambda/2 \approx 7,5\text{cm}$
 - Neue Dimensionierung

- Prüfung der Abschirmmaßnahmen (Metallgitter & Dämpfungskamine)
 - effektiv bei $f = 2000\text{ MHz}$
- Plattenabstand h wurde von 17cm auf 8 cm reduziert
 - HF-Einspeisung neu konstruiert
 - Käfige wurden auf 7 cm Höhe abgesägt (Sondergenehmigung der Tierschutzkommission)

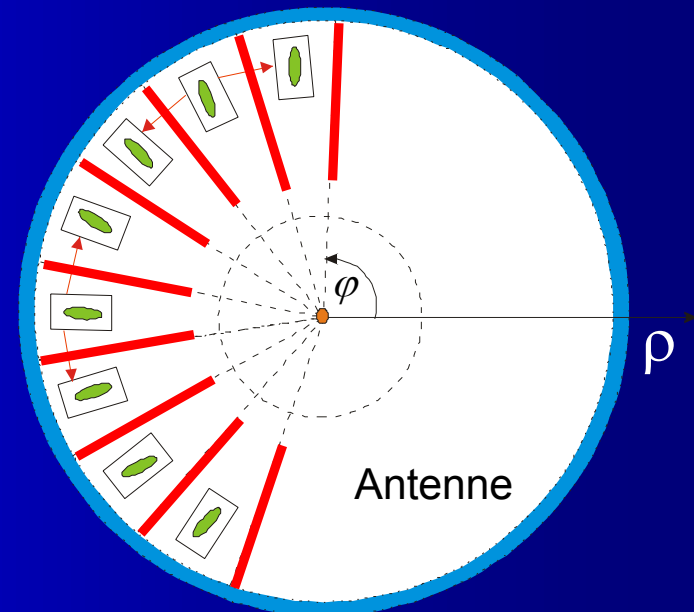


UMTS 1: Dimensionierung des Wellenleiters

$h = 8 \text{ cm} > \lambda/2 \approx 7,5 \text{ cm} \Rightarrow$ gleiche konstruktive Maßnahmen erforderlich, um die Ausbreitung höherer Wellentypen zu verhindern

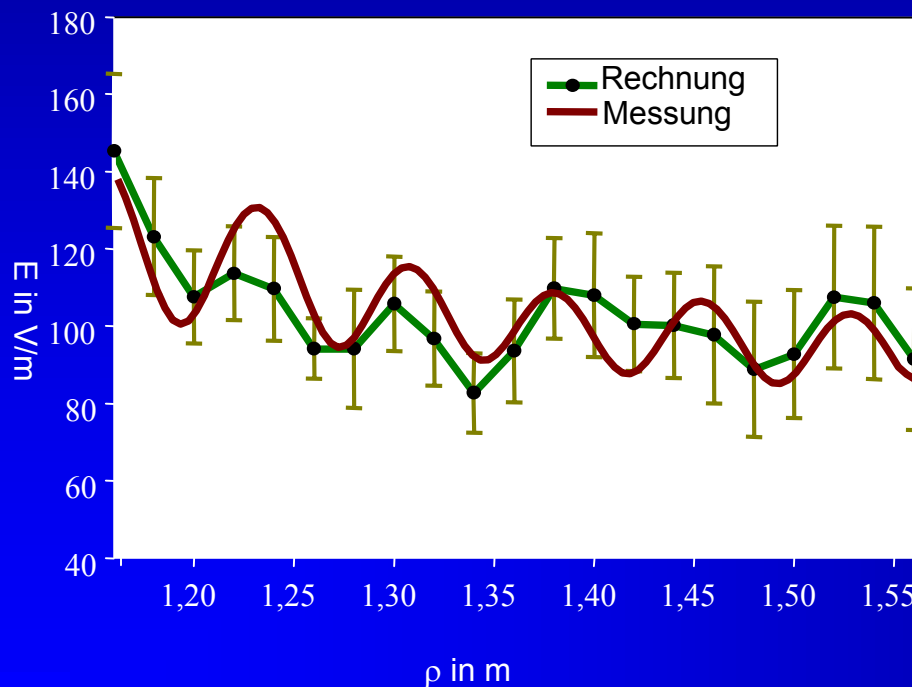


1. Gegenmaßnahme: Höhenreduzierung
 - Anregung mit der Grundwelle
2. Gegenmaßnahme: Einfügen ideal leitfähiger Stege
 - Entkopplung der Sektoren



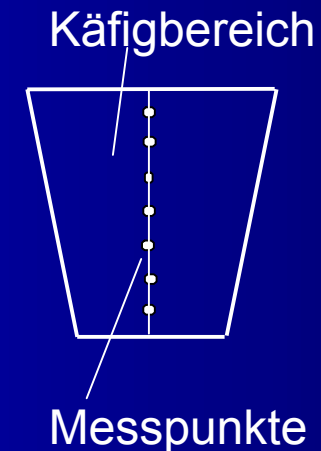
UMTS 1: Feldverteilung und Dosimetrie

- Numerische Analyse der Feldverteilung mit einem FDTD – Verfahren
- Messtechnische Analyse der Feldverteilung (Messsystem: Schmidt & Partner Engineering AG, Easy4, V4.0 und eigenes Messsystem)

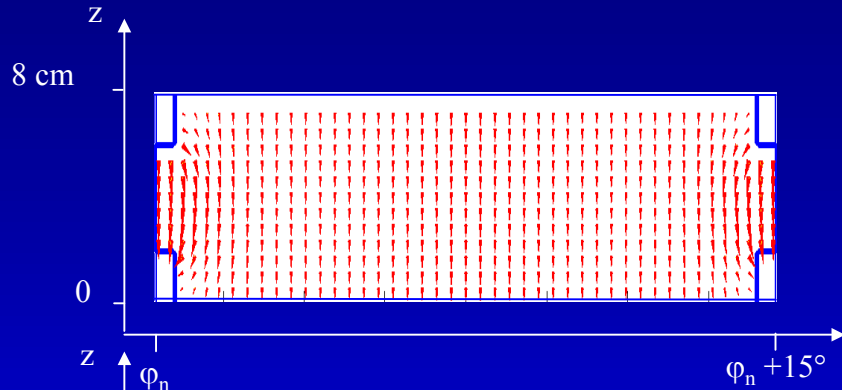


Feldvariation für alle Käfigbereiche:

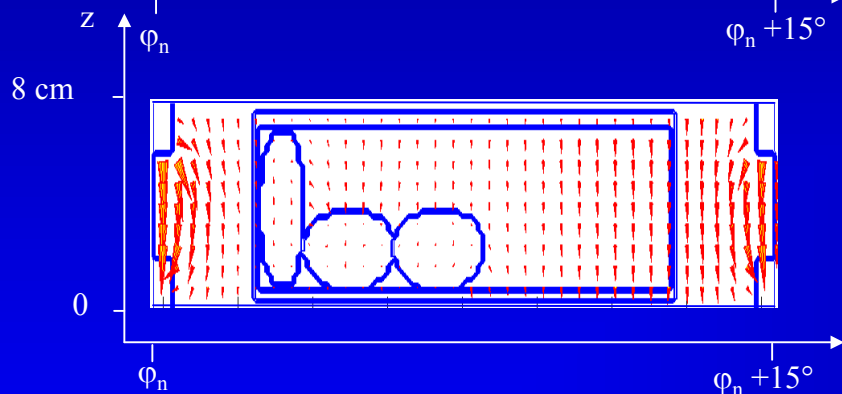
$$\sigma \approx \pm 17\%$$



UMTS 1: Feldverteilung im Querschnitt eines Expositionsbereichs



Leerer Expositionsbereich



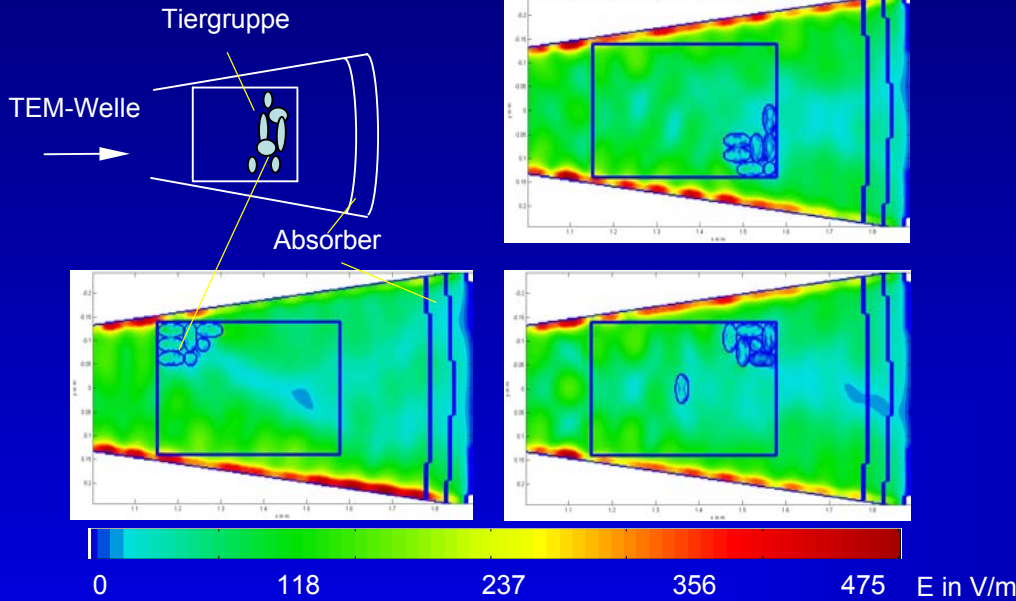
3 Streukörper befinden sich im Käfig im Expositionsbereich

➤ Lokale Feldstörung

Numerisch berechnete
Feldverteilungen im Querschnitt eines
15°-Sektors der radialen Wellenleitung
mit und ohne Tiermodelle



UMTS 1: Dosimetrie



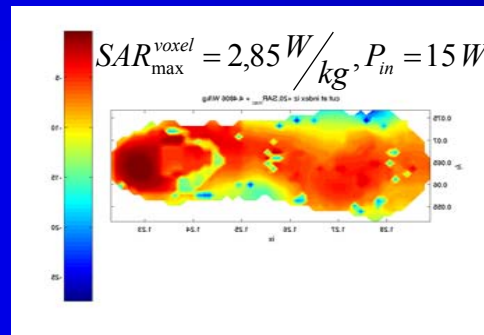
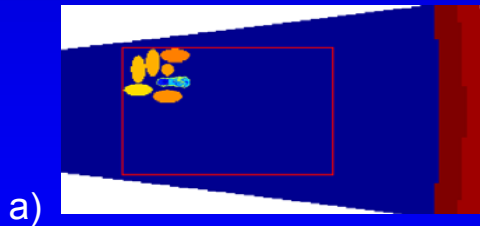
Beispiele für die elektrische Feldverteilung bei verschiedenen Gruppierungen von 7 Mäusen im Käfig ($P_{in} = 15 \text{ W}$)

$$SAR_{wb}: 0.4 \text{ W/kg}$$

$$\sigma \approx \pm 50 \%$$

Abschätzung der lokalen SAR

- a) Einfügung eines hoch aufgelösten Tiermodells
- b) SAR-Verteilung



Ganzkörper SAR für diesen Einzelfall: $SAR_{wb} = 0,253 \text{ W/kg}$

Über 10g : $SAR_{10g} < 0,3 \text{ W/kg}$

UMTS 2: Langzeitexposition mit Mäusen

- Exposition mit einem generischen UMTS-Testsignal bei 2000 MHz
- 4 Tiergruppen werden zeitgleich exponiert:
 - 1.Dosis: 0 (Scheinexposition)
 - 2. Dosis: 0.08 W/kg
 - 3. Dosis: 0.4 W/kg
 - 4. Dosis: 1.3 W/kg



UMTS 2: Design der Studie

2 trächtige Weibchen & 1 Männchen

14 Tage



1 trächtiges Weibchen & 1 Männchen

7 Tage



1 Weibchen (erneut trächtig),
1 Männchen & 6 Jungtiere

21 Tage

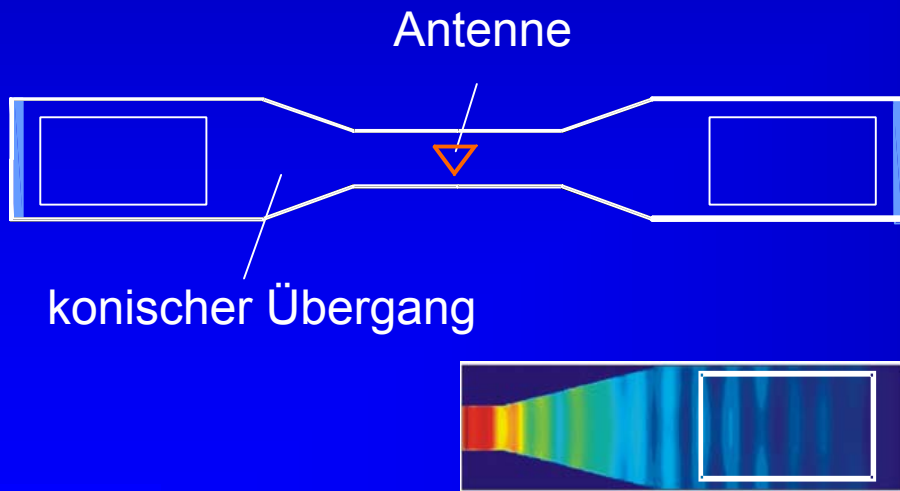
- Anzahl der Mäuse pro Käfig sowie deren Körpergröße unterliegen einer großen Variation



UMTS 2: Anregung des Expositionsbereichs mit dem Grundwellentyp

- Um eine einwellige Anregung zu gewährleisten, wird die Höhe der Leitung mit einem konischen Übergang von 6cm ($h \leq \lambda/2$) nach außen hin auf 17cm vergrößert.

- ➔ gleichmäßige Feldverteilung in vertikaler Richtung im Expositionsbereich
- ➔ Das Expositionsfeld ist durch die TEM-Welle gegeben



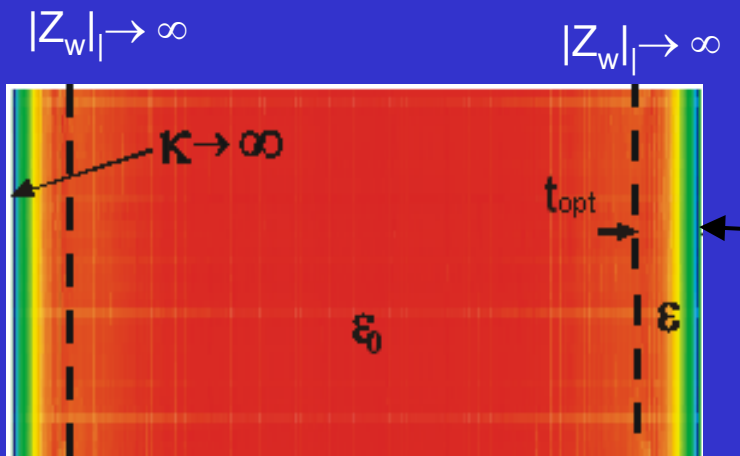
- Feldkomponenten in x- und y-Richtung sind vernachlässigbar im Vergleich mit der Hauptkomponente in z-Richtung



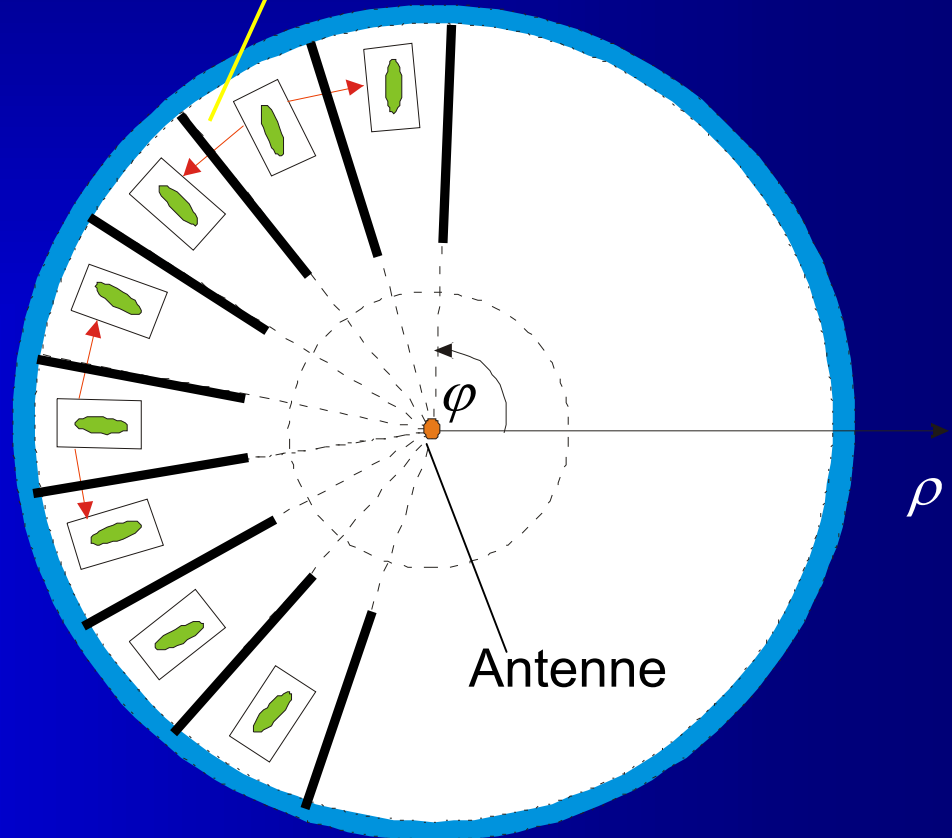
UMTS 2: Separation der Käfigbereiche

⇒ Konstante Feldverteilung im Expositionsbereich

⇒ $|E|$: $\sigma \approx \pm 11\%$



Trennwände mit $|Z_w| \rightarrow \infty$ verhindern die azimutale Verkopplung des Feldes der einzelnen Expositionsbereiche



UMTS 2: Eigenschaften der Trennwände

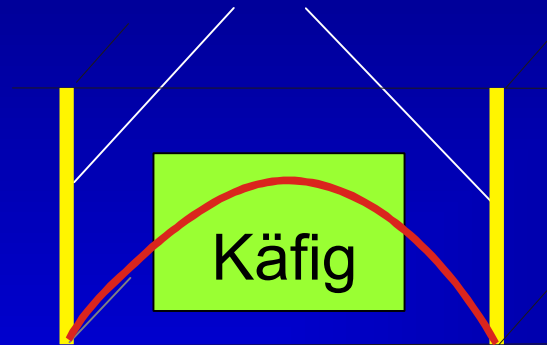
ohne Wände



konstante
Feldverteilung

aber seitliche
Verkopplung

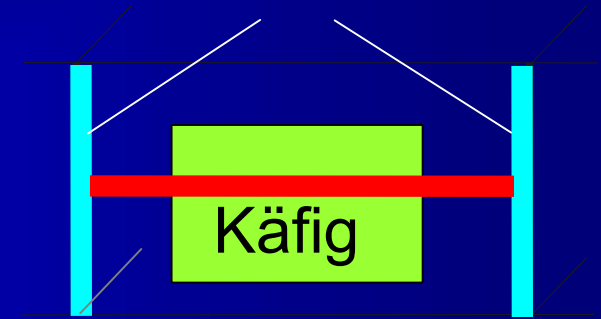
metallische
Wände



keine seitliche
Verkopplung

aber sinusförmige
Feldverteilung

modifizierte
metallische Wände



keine seitliche
Verkopplung

und konstante
Feldverteilung



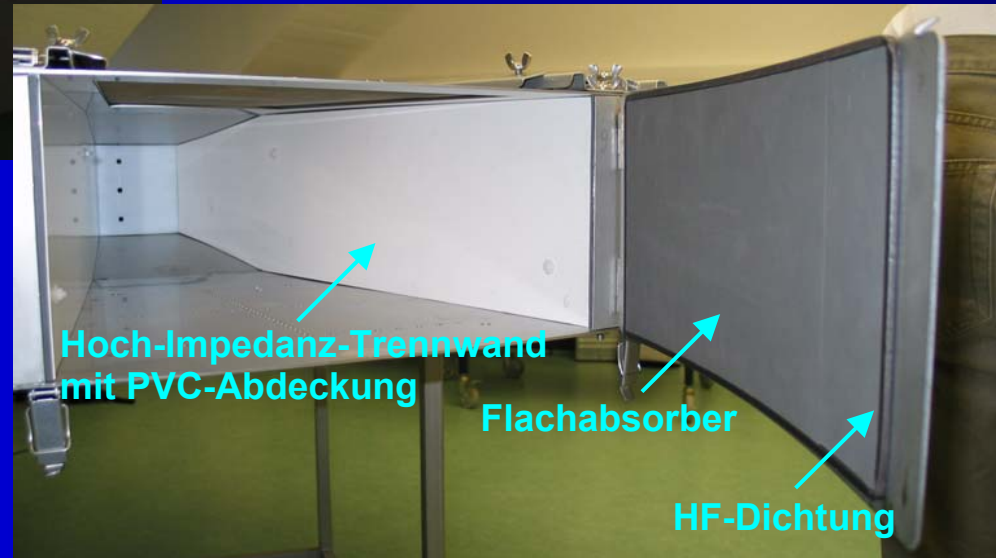
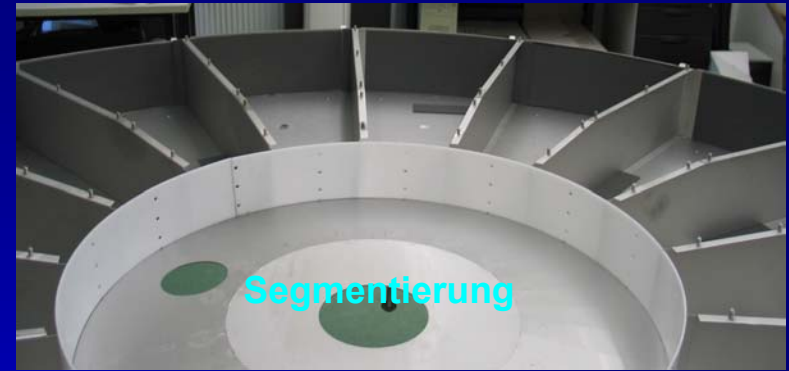
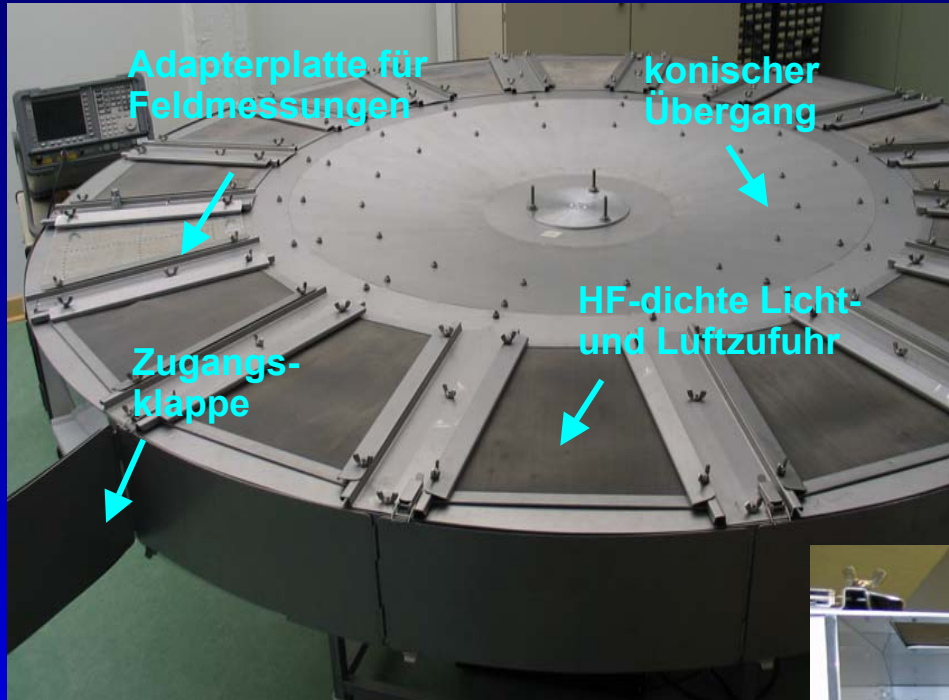
UMTS 2: installierte Expositionsanlage



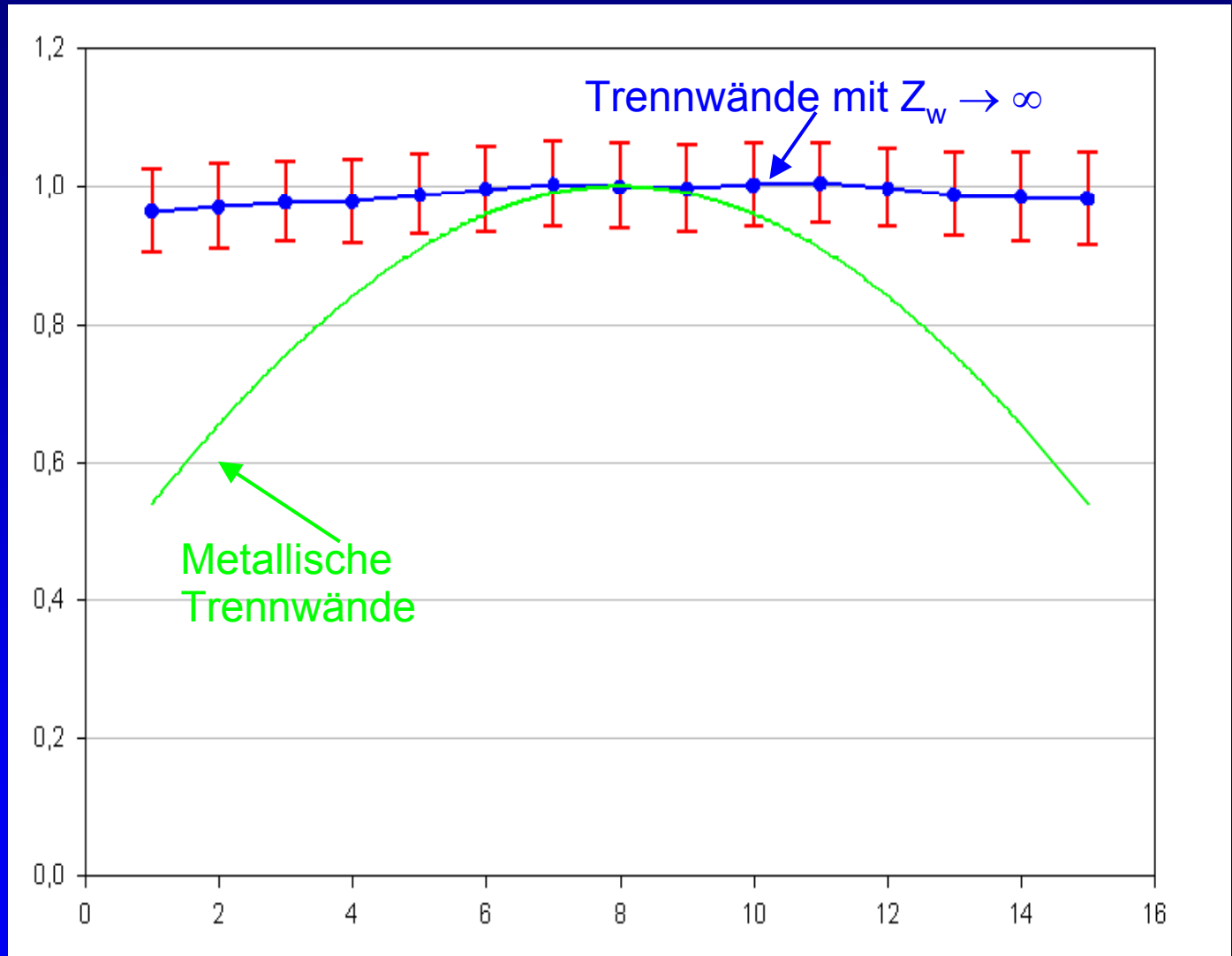
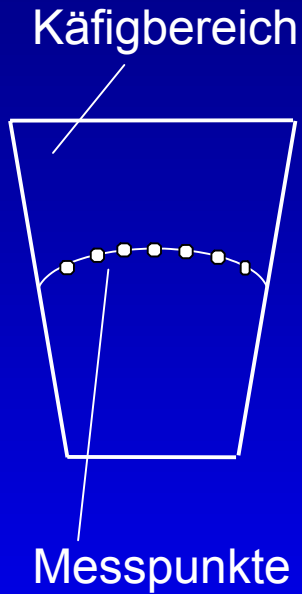
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal

Reinhardt, Bitz, El Ouardi, Streckert, Hansen, Lerchl

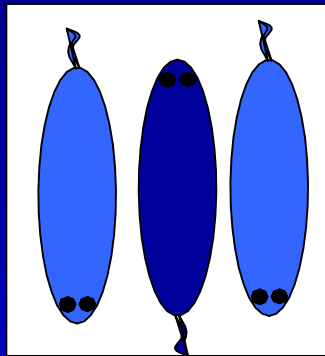
UMTS 2: Detaillierter Aufbau der Expositionsanlage



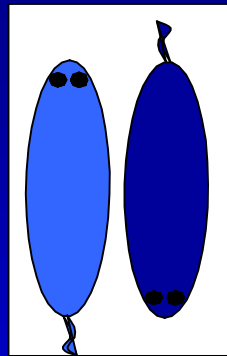
UMTS 2: Feldmessungen in einer baugleichen Expositionsanlage



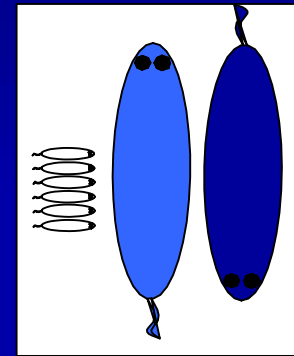
UMTS 2: Konfigurationen und Modelle



2 trächtige
Weibchen &
1 Männchen

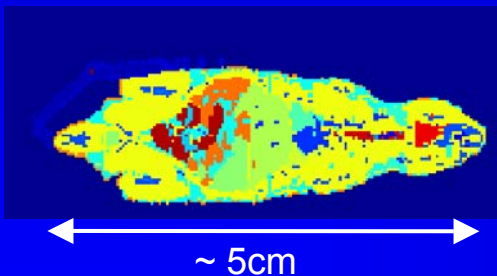


1 trächtiges
Weibchen &
1 Männchen

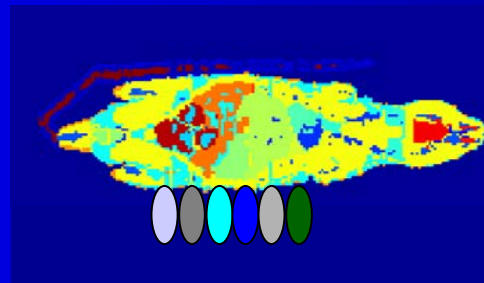


1 Männchen &
1 Weibchen &
6 Jungtiere

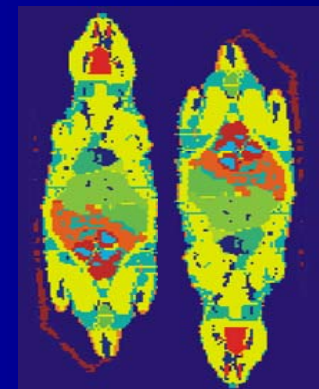
1 trächtige Maus



Muttertier mit 6 Jungtieren



2 erwachsene Mäuse



Zusammenfassung

konstruktive Maßnahmen: Projekt 1 & Projekt 2

- Höhenreduzierung durch Sprung, so dass nur mit der Grundmode angeregt wird
- Entkopplung der Felder und Unterdrückung höherer Wellentypen durch das Einfügen ideal leitfähiger Stege

konstruktive Maßnahmen: Projekt 3

Höhenreduzierung durch konischen Übergang

Entkopplung der Felder durch Trennwände mit $|Z_w| \rightarrow \infty$

Projekt 1: SAR: $\sigma \approx \pm 40\%$

Projekt 2: SAR: $\sigma \approx \pm 50\%$



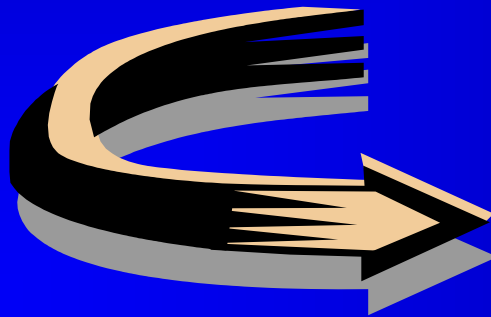
Ausblick

Projekt 3:

Ausführliche numerische Berechnungen

für etwa 30 verschiedene Modelle

Modellierung unter Berücksichtigung real vorkommender Konfigurationen, Körperhaltungen und relativer Positionen der Mäuse zueinander.



Zuverlässige Statistik



Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Universität Wuppertal